УДК 621.1.016.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТЕНОК ТРУБ МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

А.А. Макеев

Томский политехнический университет
E-mail: ghost@tpu.ru

Представлены положения, обосновывающие структурную зависимость термического сопротивления материалов стенок труб, изготовленных из котельных сталей в размерных толщинах, где проявляются эффекты приграничных скачков температуры, создающие искажения в измерениях коэффициента теплопроводности. Установленные зависимости объясняются с позиций структурного трещинообразования в подповерхностных областях.

При исследовании процессов теплообмена в многослойных цилиндрических конструкциях, к которым можно отнести многоэлементные системы теплосброса петлевых каналов исследовательских ядерных реакторов, коллекторные пакеты электрогенерирующих каналов термоэмиссионных ядерных энергетических установок, многоэлементные сварные или паяные конструкции, состоящие из тонкостенных труб, тонкие покрытия, нанесённые термическим и гальваническим способом и другие термически тонкие слоистые тела, важное значение приобретает термическое сопротивление тонкостенных оболочек, составляющих теплопередающую систему. В современной науке о теплообмене определяют «термическое сопротивление», когда речь идет о транспорте тепла через комплекс конструкционных материалов. Классически транспорт тепла через конструкционные материалы обычно связывается с понятием о теплопроводности, коэффициенте теплопроводности λ, коэффициенте температуропроводности a, когда речь идет о нестационарных процессах, что применимо и обосновано для массивных, однородных, сплошных физических тел. Явления рассеяния энергии на поверхности относят к теплоносителям или тепловому излучению. Практика экспериментального исследования конвективного теплообмена, критических тепловых потоков при кипении, природы контактного теплообмена, теплового рассеяния на поверхности твердых тел, тепловой аккомодации в газах предпочтительно приводит к регистрации температурных перепадов в приграничной области.

Среди исследователей не существует единства в понимании физического механизма образования температурных перепадов в приграничных областях сред, транспортирующих тепло. Когда речь идет о порядке величины, значения термического сопротивления на границах, существующие модели и гипотезы диффузного рассеяния теплового излучения, теории микрослоя в конвективном теплообмене, тепловой аккомодации в газах, природы возникновения кризисов кипения и значении контактных пятен в образовании теплопроводящей поверхности при контактировании твердых тел оцениваются различным образом. Эффект нелинейности температурного профиля на границе металла (эффект Жака) [1] и в кристаллах при низких температурах, неодинаковая теплопроводность внутри тела и вблизи его границ объясняются изменением длины свободного пробега фононов, электронов, молекул газа, вследствие концентрации дислокаций из-за механической, термической и другой обработки поверхности или другой причины. С точки зрения теории физики твердого тела тепловое рассеяние на границе твердого тела не отличается от процессов рассеяния тепловой энергии в его объеме, что дает основания считать, что термическое сопротивление и теплопроводность твердого тела связаны геометрическими характеристиками. В литературе тем не менее не удается обнаружить порядок температурного скачка на границе твердого тела. В опубликованных результатах исследований теплопроводности тонких плёнок выделяют область с резкой зависимостью теплопроводности от толщины (70...80 нм) и области (>200 нм), где величина λ монотонно приближается к справочному значению для массива [2]. Решая вопросы экспериментального исследования термического сопротивления тонкослойных элементов системы теплосброса петлевого канала, технологии тонкопленочных конструкций и термической стабильности материалов, нужно принимать во внимание существование аномальных явлений теплопроводности, когда речь идет о высоких тепловых потоках и температурах.

Общепризнанные методики расчета теплопередачи рассматривают температурный перепад в многослойной теплопроводящей системе как результат суммирования термических сопротивлений отдельных участков. Независимо от условий теплообмена температурные перепады в тонких оболочках определяют как функцию теплового потока и отношения толщины стенки оболочки к среднему значению коэффициента теплопроводности. Механизм передачи тепла в твердом теле в соответствии с линейным законом Фурье является равновесным по форме, т.е. экспериментальное значение коэффициента теплопроводности можно найти тем точнее, как функцию температуры, чем меньше температурный перепад. В реальных условиях интенсивного теплообмена в тонкостенных, оболочечных, трубных конструкциях от высокотемпературного источника тепла к низкотемпературному рабочему телу чаще приходится сталкиваться с явлениями теплового переноса в неравновесных

внешних термодинамических режимах. Видимо, константы теплового переноса в неравновесных условиях теплообмена нужно определять по другому. Рассматривая основные законы теплового излучения, многие авторы отмечают, что в процессах лучистого теплообмена участвуют лишь тонкие поверхностные слои металлов, порядка 1 мкм, и изоляторов до 1 мм, тем самым тепловое излучение определяется как чисто поверхностное явление. При обсуждении методики измерения коэффициентов теплопроводности перенос тепла в твердом теле рассматривается как объемное явление, а все поверхностные факторы предлагается отбрасывать.

В [3] приводятся ссылки на работы, в которых рассматриваются явления аномального нагрева (охлаждения) поверхности твердых тел, подвергнутых интенсивному тепловому воздействию; отмечается, что природа этого явления до сих пор не изучена и связывается с увеличением плотности дефектов структуры поверхности вещества вследствие действия сил термомеханического характера. Аномальные по отношению к классической теории теплопроводности явления отмечаются в слое 40...100 мкм, т.е. в толщинах, сопоставимых со структурными характеристиками вещества. Отмечая определяющее значение характера теплового переноса в приграничных областях, авторы [3] обычно не приводят данных по количественным характеристикам, не встречаются даже оценочные данные по величинам термических сопротивлений в поверхностных структурах. В области теории контактного теплового переноса не удалось выяснить основную причину аномалий в контактной проводимости. Немногочисленные результаты измерений профиля температурного поля в металлах, выполненные Жаком [1], отражены лишь качественно, без объяснения причин, вызывающих появление нелинейности приграничного температурного профиля, не сопоставлены с известными результатами замеров термического сопротивления в системах, содержащих тонкостенные конструкции, например, твэлы ядерных реакторов и поверхности теплообмена парогенераторов с жидкометаллическими теплоносителями. В экспериментальных измерениях коэффициента теплопроводности сплавов, композиционных материалов обнаруживается сложный и неоднозначный характер зависимости теплопроводности от температуры. В объяснении причины отклонений от традиционных представлений функциональности связи коэффициента теплопроводности от температуры многие авторы рассматривают внутриструктурные изменения в материалах и композициях. В частности, отмечается роль структурных факторов в сталях.

Краткое изложение состояния вопроса прогнозирования термического сопротивления в конструкционных материалах, особенно в их сочетании, что характерно для сложных конструкций систем теплопередачи, позволяет на предварительном этапе планирования экспериментальной работы сделать следующие выводы:

1. Актуальность исследований поведения термического сопротивления тонкостенных труб в зависимости от толщины и времени не снята в связи с неустановленными причинами аномального поведения эффективного коэффициента теплопроводности в пограничных областях.
2. Термическое сопротивление тонкостенных оболочечных конструкций может отличаться от расчетного значения по известным константам и методикам, применяемым для массивных тел.
3. При проведении исследований на ресурсную стабильность элементов системы теплосброса и материалов необходимо уточнить влияние внешней неравновесности на константы теплового переноса и установить порядок их отклонения от известных значений.

Методические особенности ресурсных исследований термического сопротивления тонкостенных труб

Термостойкие тонкостенные (0,5...5 мм) трубы из легированных сталей в силу специфики их физико-механических свойств при повышенных температурах и стойкости к окислению являются распространенными материалами в энергонапряженных конструкциях. Критическое рассмотрение особенностей поведения коэффициента теплопроводности материалов труб из сталей приводит к необходимости выявления ресурсной зависимости от температуры и теплового потока. В литературе [4] при констатации характера изменений коэффициента теплопроводности тонких слоёв приводится очень ограниченное количество экспериментальных данных и почти не встречается расчетных зависимостей функциональной связи коэффициента теплопроводности от температуры и времени теплового нагружения. Считая, что термическое сопротивление тонкостенных труб из стали может подвергаться существенным ресурсным изменениям, особенно в условиях внешней неравновесности, было принято решение выполнить серию ресурсных термоциклических испытаний образцов для выявления термической нестабильности.

Двоякий характер задачи ресурсных термоциклических испытаний, заключающийся в выявлении роли термического сопротивления, его порядка и неопределенность характера его ресурсного изменения вызывает необходимость обоснования методики экспериментальных исследований. В настоящее время не существует отработанных приемов и методик, позволяющих доказать наличие температурного скачка на границе твердого тела в условиях внешней неравновесности. Нередко аномалии в определении коэффициента теплопроводности объясняются трудноустранимой погрешностью определения плотности теплового потока. Трудно обосновать и определить систематическую погрешность, которая возникает в процессе измерения температуры на поверхности материала. При использовании низких тепловых потоков соответственно возникают низкие температурные перепады на сравнительно высоких

уровнях температуры. Например, учитывая, что погрешность термоэлектродов ВР-5, ВР-20 составляет порядка 1 %, что на уровне температуры 800 °С составит отклонение порядка 16 °С, в измерении температурного перепада, достоверный температурный перепад на тонкостенной оболочке должен составить приблизительно 60 °С. Практика измерений при давлении ~$6 \cdot 10^{-3}$ Па показывает, что регистрируемые температурные перепады в тонкостенных оболочках при работе на излучение могут составить 20...30 °С. При повышении тепловых потоков трудно обосновать степень влияния теплового излучения на спай и термоэлектроды.

В основе обоснования методики измерения термического сопротивления тонкостенных оболочек находятся известные стационарные и нестационарные способы измерения теплопроводности. Использование нестационарных методов при измерении термического сопротивления основывается на идентичности технологии изготовления спаев термопар, термостатировании свободных концов и технологии заделки рабочих спаев на поверхности серии образцов различной толщины. Погрешность применяемых термопар должна иметь одинаковый знак и близкий модуль. Контрольным моментом во всей серии измерений разностной термоЭДС служит стабильность знака даже при очень низких тепловых потоках. Идентичность технологии изготовления спаев термопар ВР-5, ВР-20 обеспечивается сваркой в атмосфере инертного газа. Технологических скруток термопарный спай не имеет, рабочий конец приваривается точечной сваркой к поверхности исследуемой оболочки. Серией калибровок на термостатированных образцах и методом сличения с образцовой термопарой установлена и доказана идентичность технологии производства рабочих спаев и их заделки в образец. Предлагаемая технология позволила в дальнейшем избавиться от индивидуальной калибровки и обеспечить устойчивые метрологические характеристики.

В определении теплопроводности материала стенок труб наблюдаются эффекты, связанные с зависимостью теплопроводности от толщины образца, цикличности, температуры и времени теплового воздействия, рис. 1.

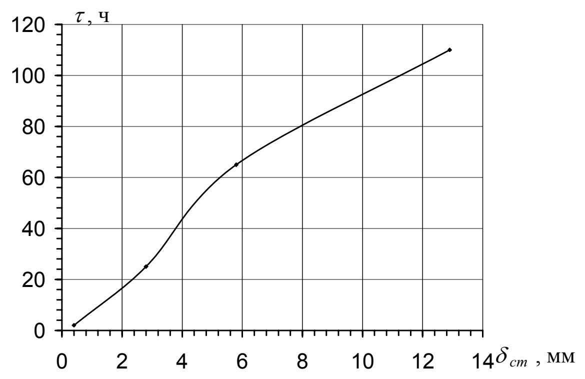


Рис. 1. *Время регистрации устойчивых значений эффективной теплопроводности от толщины материала труб из стали 0Х18Н10Т. Т=600...650 °С*

Нестационарные методы в процессе регистрации изменения термического сопротивления были использованы как способ доказательства наличия температурного скачка на границе тонкостенной трубы и применены как дополнение к измерениям в стационарном тепловом режиме.

Обнаруженные гистерезисные явления изменения термического сопротивления в процессе подъема и снижения температуры коррелировались с изменениями интегральной интенсивности линий рентгеновского отражения решетки железа в сплаве в специально организованных ресурсных высокотемпературных рентгеноструктурных испытаниях в качестве сопровождения теплофизических. Исследования температурных изменений структурных напряжений соответствуют сложным проявлениям термического сопротивления, рис. 2.

Измерения термического сопротивления были проведены в два этапа. На первом этапе основной задачей ставилось обнаружение отклонения термического сопротивления от расчетного. На втором этапе исследований проводились ресурсные испытания образцов из нержавеющей стали с целью выявления ресурсной нестабильности термического сопротивления и построения обобщенной кривой зависимости эффективного коэффициента теплопроводности нержавеющей стали от толщины оболочки по стабильным значениям термического сопротивления, полученного в ходе ресурсных испытаний.

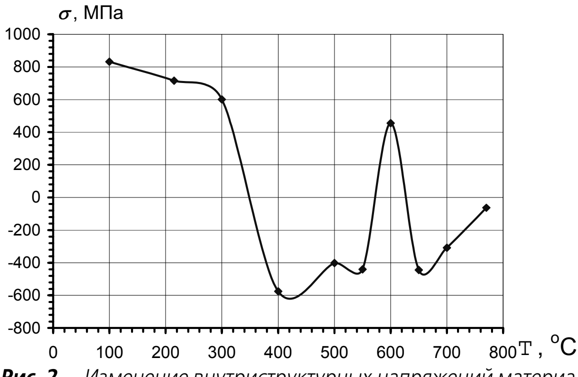


Рис. 2. *Изменение внутриструктурных напряжений материала трубы из ст 10 в зависимости от температуры*

Нестационарные методы определения термического сопротивления тонкостенных труб не получили широкого распространения и обоснования. Стремясь восполнить этот пробел, в работе проделана попытка обоснования применения нестационарного метода для обнаружения температурного скачка на поверхности тонкостенной оболочки. В основу рассмотрения закладываются следующие положения:

1. При воздействии теплового потока на материал возникает нелинейный температурный профиль в приграничной области.
2. Термическое сопротивление материала при воздействии теплового потока на поверхность не совпадает с его значением, вычисленным через коэффициент теплопроводности и геометрические характеристики образца.

3. На поверхности материала, облучаемого лучистым тепловым потоком, возникают явления теплового рассеяния, сходные с известной тепловой аккомодацией в газах.
4. Температурные и ресурсные структурные изменения в материалах стенок труб способны вызвать соответствующие изменения термического сопротивления.

Существующие способы определения коэффициента теплопроводности основаны на измерении стационарных температурных перепадов на границах области различной геометрии. В предположении, что температурный профиль внутри рассматриваемой геометрической области имеет линейный характер, например, в случае неограниченной пластины, согласно закона Фурье, коэффициент теплопроводности λ определяется по выражению:

$$\lambda = q\cdot\delta/\Delta T,$$

где λ – коэффициент теплопроводности; δ – толщина пластины; ΔT – температурный перепад.

Методиками обработки результатов измерений нелинейность температурного профиля учитывается аппроксимацией и построением зависимости $\lambda=f(T)$, средняя температура зависит от способа осреднения, при этом предполагается, что в узком диапазоне значений ΔT распределение температурного поля по области δ имеет линейный характер. Обработка результатов измерений и их обобщение в виде $\lambda \sim f(T)$ дает основание считать, что коэффициент теплопроводности пропорционален тангенсу угла наклона температурного поля вдоль координаты «x» в центре неограниченной пластины при температуре $T=0,5(T_в-T_н)$, где $T_в$ и $T_н$ – температура со стороны теплового воздействия и со стороны теплового рассеяния соответственно.

Изменений потока энергии в малом интервале величин от Q_1 до Q_2 вызывает соответствующие изменения угла наклона температурного профиля, при этом в пластине толщиной Δx концентрируется энергия:

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = c(T)\cdot\rho(T)V\cdot\Delta T, \qquad (1)$$

где: $\Delta T=0,5[(T_в^{(2)}-T_в^{(1)})+(T_н^{(2)}-T_н^{(1)})]=\delta T_в+\delta T_н$, c, ρ, V – теплоёмкость, плотность и объём.

В малом интервале температур, где зависимостью $\lambda(T)$ можно пренебречь, используя закон Фурье, запишем:

$$\Delta Q = \lambda(T)\cdot(\Delta T_2-\Delta T_1)F\tau/\Delta x, \qquad (2)$$

где $\Delta T_2=T_в^{(2)}-T_н^{(2)}$; $\Delta T_1=T_в^{(1)}-T_н^{(1)}$, F, τ – площадь поверхности и время соответственно.

Объединяя выражения (1) и (2), после преобразований, имеем:

$$\rho(T)c(T)=2\lambda(T)F\tau/\Delta x;$$

из этого равенства выразим:

$$\lambda(T)=c(T)\rho(T)\Delta x/(2F\tau);$$

$$\lambda(T)=c(T)\rho(T)(\Delta x)^2/(2\tau). \qquad (3)$$

Таким образом, для определения $\lambda(T)$ необходимо найти время наступления квазистационарного теплового режима τ:

$$\tau=c(T)\rho(T)(\Delta x)^2/2\lambda(T).$$

Под этим режимом понимается время, в течение которого устанавливается устойчивое значение теплового потока в нагреваемом образце.

В качестве примера, необходимого для оценок, можно взять данные для образца из стали 0Х18Н10Т толщиной стенки 4,9 мм и для сравнения с толщиной стенки 2,8 мм. Пользуясь справочными данными [5], примем константы: $c(T)$=586 Дж/кг·К; $\rho(T)$= 7500 кг/м^3; $\lambda(T)$= 20 Вт/м·К .

Расчётное время наступления квазистационарного режима для стенки 4,9 мм составит:

$$\tau_{4,9}=586\cdot7500\cdot(2,8\cdot10^{-3})^2/2\cdot20=2,64 \text{ с}.$$

Соответственно, для стенки 2,8 мм: $\tau_{2,8}$=0,66 с.

Для того, чтобы в этом образце стали установился температурный перепад за 1 мин, необходима толщина стенки:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{2\cdot\lambda(T)}{c(T)\cdot\rho(T)}\cdot\tau} = 23,36 \text{ мм}.$$

Таким образом, зарегистрировать время наступления квазистационарного режима для тонкостенных труб без применения специальных приборов затруднительно. Существующие приборы теплового контроля, применяемые в экспериментальных исследованиях, позволяют зарегистрировать это время в течение десятка мин, что потребует применения образцов из нержавеющей стали толщиной десятков мм. На рис. 3, 4 отмечены значения эффективной теплопроводности, полученные в стационарных тепловых режимах. Время перехода от точки к точке – 1,5...2,0 ч. Из графиков видно, что в последовательности циклов измерений отмечаются гистерезисные явления. В предположении существования нелинейного температурного профиля задача определения коэффициента теплопроводности осложняется неявным характером зависимости $T=f(x)$, что делает невозможным осреднение теплофизических констант. Наблюдаемые гистерезисные явления в изменении термического сопротивления, следовательно эффективной теплопроводности, сопровождаются изменением внутренних напряжений. Внутренние напряжения под воздействием температуры подвержены бейнитным структурным превращениям, меняют величину и знак, приводят к трещинообразованию и развитию внутренней пористости. В этих условиях получение устойчивых значений термического сопротивления затруднён развитием релаксационных процессов.

Сделаем попытку получить выражения для оценки времени наступления квазистационарного теплового режима в предположении существования температурного скачка вблизи границы пластины. Для этого воспользуемся методикой получения выражения, рассмотренной для случая линейного температурного профиля. Пренебрегая аккумуляцией энергии в поверхностных слоях материала, запишем выражение для расчета измене-

ния энергии, $\Delta Q = c(T)\rho(T)V\Delta T$, сконцентрированной внутри пластины при увеличении внешнего потока тепла, ΔQ от величины Q_2 до Q_1, или через плотность теплового потока:

$$\Delta Q = \Delta q_F F. \quad (4)$$

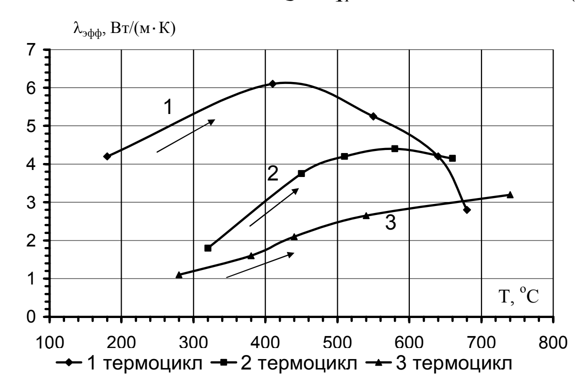


Рис. 3. *Характер изменения эффективной теплопроводности материала стенки трубы из стали 0Х18Н10Т в первых трех термоциклах для* $\delta_{ст}=3,8$ *мм*

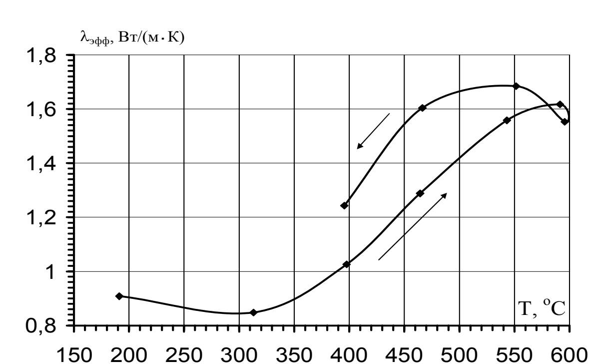


Рис. 4. *Температурный гистерезис эффективной теплопроводности материала трубы толщиной 5 мм из стали 12Х1МФ*

Принимая за основу распределения температур закон Фурье, имеем: $q_F = \lambda \dfrac{dT}{dx}$, в интегральной форме выражение (4) запишется:

$$\Delta Q = \lambda \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\Delta x} F\tau, \quad (5)$$

где $\Delta T_1 = T_в^{(1)} - T_н^{(1)}$, $\Delta T_2 = T_в^{(2)} - T_н^{(2)}$.

Предположим, что с погрешностью, равной погрешности эксперимента, разность средних температур ДТ мало отличается от перепадов температуры на внутренней и наружной стенке пластины, т.е. примем равенство:

$$\Delta T = T_в^{(1)} - T_в^{(2)} = T_н^{(1)} - T_н^{(2)}. \quad (6)$$

В соответствии с предположением, запишем:

$$\Delta Q = c(T)\rho(T)V(T_в^{(1)} - T_в^{(2)}) = c(T)\rho(T)V(T_н^{(1)} - T_н^{(2)}). \quad (7)$$

Сопоставляя (5) с (7), имеем равенство:

$$\lambda(T)F\tau(T_в^{(1)} - T_н^{(2)})/\Delta x = c(T)\rho(T)V(T_в^{(1)} - T_в^{(2)}),$$

преобразование которого выглядит:

$$\lambda(T)\frac{1 - \dfrac{T^{(1)}{}_н - T^{(2)}{}_н}{T^{(1)}{}_в - T_в^{(2)}}}{\Delta x} F\tau = C(T)\rho(T)V, \quad (8)$$

тогда формула для определения коэффициента теплопроводности приобретает следующий вид:

$$\lambda(T) = \frac{c(T)\cdot\rho(T)\cdot V\cdot\Delta x}{F\cdot\tau(1 - \dfrac{T_н^{(1)} - T_н^{(2)}}{T_в^{(1)} - T_в^{(2)}})};$$

применяя коэффициент температуропроводности в виде: $a = \lambda(T)/[c(T)\rho(T)]$ и учитывая, что $V = F\Delta x$, имеем равенство:

$$a = \frac{\Delta x^2}{\tau\cdot(1 - \dfrac{T_н^{(1)} - T_н^{(2)}}{T_в^{(1)} - T_в^{(2)}})}.$$

Обозначая безразмерный относительный температурный перепад как $\Theta = \dfrac{T_н^{(1)} - T_н^{(2)}}{T_в^{(1)} - T_в^{(2)}}$, представим равенство (8) в критериальной форме: $\mathrm{Fo}_в = \dfrac{1}{1-\Theta}$, здесь $\mathrm{Fo} = a\cdot\tau/(\Delta x)^2$ – критерий Фурье.

Представляя выражение (8) в виде:

$$\lambda(T)\frac{T_в^{(1)} - T_в^{(2)}}{T_н^{(1)} - T_н^{(2)}} F\tau = c(T)\rho(T)V(T_н^{(1)} - T_н^{(2)}),$$

или:

$$\lambda(T)\frac{\dfrac{T_в^{(1)} - T^{(2)}{}_в}{T^{(1)}{}_н - T_н^{(2)}} - 1}{\Delta x} F\tau = c(T)\rho(T)V,$$

после преобразований получим: $a(T)\cdot\dfrac{\frac{1}{\Theta} - 1}{\Delta x} F\tau = V$,

в критериальной форме: $\mathrm{Fo}_н = \dfrac{\Theta}{1-\Theta}$.

В случае, если температурные перепады на внутренней стенке пластины выше, чем на наружной, то $\Theta<1$ и $\tau(T)$ имеет конечное значение, если наблюдается равенство температурных перепадов, то термическое сопротивление пластины определяется поверхностными скачками температуры.

Пример: для образца трубы стали 0Х18Н10Т толщиной стенки $\Delta x = 4{,}9\cdot10^{-3}$ м, в стационарном тепловом режиме с измеренными значениями: $\Delta T_в = 66{,}67$ °С, $\Delta T_н = 64{,}88$ °С, $\Delta Q = 184{,}9$ Вт, $T_в^{(2)} = 623{,}81$ °С, $T_в^{(1)} = 690{,}48$ °С, $T_н^{(2)} = 616{,}67$ °С, $T_н^{(1)} = 681{,}55$ °С, $\tau = 1800$ с, расчёты по вышеприведенным формулам приводят к следующим значениям коэффициентов теплопроводности:

$$\Theta = \frac{T_н^{(1)} - T_н^{(2)}}{T^{(1)}{}_в - T^{(2)}{}_в} = 0{,}973;\ \mathrm{Fo}_в = \frac{1}{1-\Theta} = 37{,}244;$$

$$\mathrm{Fo}_н = \frac{\Theta}{1-\Theta} == 36{,}244;$$

$$\lambda_в = \frac{\mathrm{Fo}_в c\rho\Delta x^2}{\tau} = 2{,}184 \text{ Вт/м}\cdot\text{К};$$

$$\lambda_н = 2{,}125 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}.$$

Столь низкие значения эффективного коэффициента теплопроводности объясняются специфичным нелинейным профилем температуры по толщине образца трубы с характерной микроповреждаемостью микротрещинами в подповерхностных слоях, рис. 5.

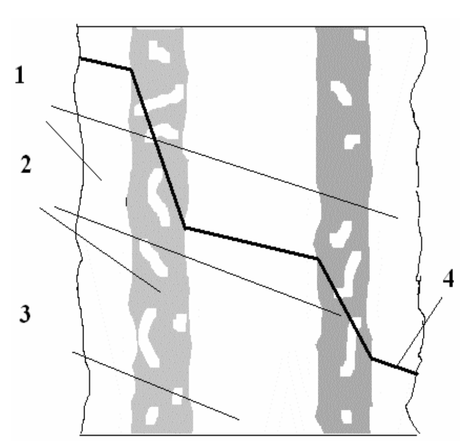


Рис. 5. *Физическая модель плоской теплопередающей стенки: 1) шероховатая поверхность; 2) подповерхностный слой; 3) глубинный слой; 4) температурный профиль*

О существовании структурных повреждений под поверхностью стенок труб свидетельствуют измерения профиля микротвёрдости, рис. 6.

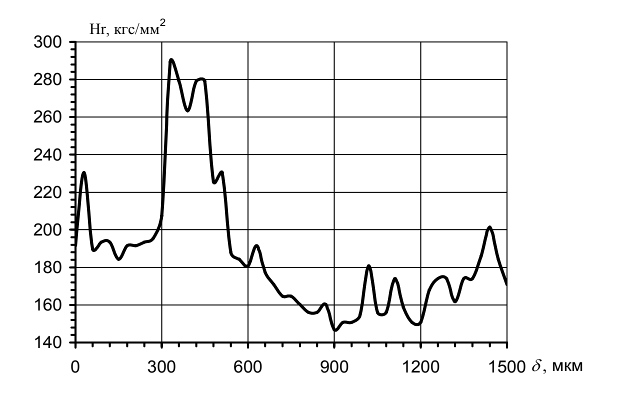


Рис. 6. *Изменения микротвердости по толщине стенки материала трубы (начиная с наружной стороны), изготовленной из ст10*

Выводы

1. Эффективный коэффициент теплопроводности тонкостенных стальных труб можно определить по моменту регистрации квазистационарного теплового режима при ударном термическом нагружении.
2. Причиной термических скачков на поверхности труб может служить многочисленная серия неустранённых отжигом и нормализацией структурных микротрещин под поверхностью вследствие механических повреждений при прокатке, наличие которых находит косвенное подтверждение в измерении профиля микротвёрдости и температурных изменений внутриструктурных напряжений второго рода.
3. Установлено, что эффективный коэффициент теплопроводности на внутренней стенке трубы имеет более высокие значения, чем на наружной.
4. Практика показывает, что время установки стационарного теплового перепада температуры на границах тонкостенных труб составляет десятки мин. Это дает основание считать, что в тонкостенных трубах присутствует нелинейный профиль температуры, значит, имеют место поверхностные температурные скачки.
5. Экспериментально измеренные значения эффективного коэффициента теплопроводности материала образцов стенок труб, изготовленных из котельных сталей марок ст10, 12Х1МФ, 0Х18Н10Т, при многократном термическом нагружении показали первоначальные отклонения от справочных значений теплопроводности на порядок меньшими.
6. Для подтверждения справочного значения коэффициента теплопроводности λ=20 Вт/м·К для нержавеющей стали 0Х18Н10Т расчетное время наступления квазистационарного режима в линейной зависимости должно составить порядка τ=2...3 с, а в предположении существования нелинейной зависимости температурного профиля экспериментальное значение достигает 180 с, что соответствует теплопроводности 2,1...2,2 Вт/м·К. Устойчивые значения термического сопротивления достигаются за десятки часов отжига, в зависимости от толщины образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Л.Л. Международная конференция по теплообмену // Инженерно-физический журнал. – 1962. – Т. 5. – № 8. – С. 140–142.
2. Абросимов В.М., Егоров Б.Н., Лидоренко Н.С. и др. Исследование теплопроводности тонких плёнок // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1968. – Т. 54. – С. 530–532.
3. Кутателадзе С.С, Рубцов Н.А., Верте А.Э. Нестационарное взаимодействие теплового излучения с поверхностями чистых металлов // Доклады АН СССР. – 1972. – Т. 206. – № 1. – С. 71.
4. Сергеев О.А., Чистяков Ю.А. Измерение теплопроводности тонких слоёв твёрдых веществ // Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области тепловых измерений. –1969. – Вып. 111(171). – С. 40–53.
5. Охотин А.С., Боровикова Р.П., Нечаева Т.В., Пушкарский А.С. Теплопроводность твёрдых тел: Справочник / Под ред. А.С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.
6. Исаев К.Б. Определение коэффициента теплопроводности материалов // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26. – № 2. – С. 46–55.
7. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. – М.: Мир, 1968. – 464 с.